

Die Eroberung neuer Spektralbereiche in der Astronomie

Voigt, Hans-Heinrich

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 1993 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.217-227



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

HANS-HEINRICH VOIGT, Göttingen

Die Eroberung neuer Spektralbereiche in der Astronomie*

Als ich vor rund 45 Jahren mit meiner wissenschaftlichen Laufbahn begann, zählte die Astronomie zu den „Orchideenfächern“. Hiermit charakterisierte man in der ersten Aufbauphase der Universitäten nach dem Kriege Fächer, die sich weitab vom Massenbetrieb der Universität im kleinen Kreis mit nur wenigen Studenten der Forschung eines besonderen Spezialgebietes widmen konnten. Arabistik, Urgeschichte, Palynologie und eben auch Astronomie zählten zu diesen Orchideenfächern oder wurden zumindest dafür gehalten. Heute dürfte die Astronomie hinsichtlich ihres technischen Aufwands nach der Kernphysik an zweiter Stelle stehen und gehört, wie man sagt, zum „Big Science“. Charakteristisch dafür ist vielleicht, daß sich in Deutschland vier Max-Planck-Institute der astronomischen Forschung widmen, und es ist wohl kein Zufall, daß die jetzigen oder früheren Direktoren dieser vier Institute alle heute hier zu Wort gekommen sind. Es muß also einiges passiert sein, wenn sich die Einstufung der Astronomie dermaßen geändert hat.

Es sind ganz unterschiedliche Dinge, die diese rasante Entwicklung bedingt haben. Da ist zum Beispiel die Entwicklung der Computer, die es erlauben, komplizierte Differentialgleichungs-Systeme numerisch zu lösen, die früher nicht zu handhaben waren, die es erlauben, ungeheurere Datenmengen zu verarbeiten (eine moderne CCD-Kamera liefert alle paar Minuten Millionen Einzeldaten), und anderes mehr. Aber das betrifft nicht nur die Astronomie sondern praktisch alle Wissenschaftsgebiete. Ein anderes ist die „Weltraumforschung“, also die Möglichkeit, mit Hilfe von Satelliten und Raumfähren Messungen „in situ“, also an Ort und Stelle durchzuführen. Denken Sie an Voyager 2, der in einem 12jährigen Flug die Planeten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun besuchte und phantastische Aufnahmen von den Oberflächen der Planeten, von ihren Ringen und ihren Monden, die wir bis dahin nur als schwache Pünktchen oder gar nicht kannten, herunterfunkten; denken Sie an die weichen Landungen auf dem Mond, der Venus und auf dem Mars, oder an die Giotto-Mission zum Halleyschen Kometen. Ein ungeheurer Erfolg für die Erforschung unseres Planetensystems, das aber nur einen kleinen Ausschnitt aus dem weiten Bereich der Astronomie darstellt. Typisch für die Astronomie insgesamt und typisch speziell für die Astronomie scheint mir eine andere Entwicklung zu sein: das Vordringen in neue Spektralbereiche. Hierüber möchte ich in den nächsten 40 Minuten ein wenig berichten und damit auch eine Art Rahmen geben zu dem, was wir heute vormittag in drei Spezialvorträgen aus dem Bereich der Radio-, der Infrarot- und der Röntgenastronomie gehört haben.

Wir wollen uns dazu das Spektrum der elektromagnetischen Wellen noch einmal vergegenwärtigen (Abbildung 1):

* Vortrag anlässlich der Verleihung der Gauß-Medaille der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft am 11. 06. 1993.




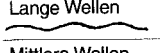
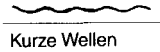
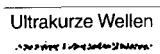




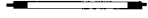







Wellenlänge	Frequenz [Hz]	Wellen- und Strahlenart	
10 000 km	30	Niederfrequenz	Technischer Wechselstrom 16 $\frac{1}{3}$ bzw. 50 Schwingungen je Sekunde 
1000 km	300		Sprach- und Musikschwingungen elektrischer Ströme
100 km	3000		Niederfrequente elektrische Schwingungen 
10 km	30 Tausend		
1 km	300 Tausend	Elektromagnetische Wellen	Lange Wellen 
100 m	3 Millionen		Mittlere Wellen 
10 m	30 Millionen		Kurze Wellen 
1 m	300 Millionen		Ultrakurze Wellen „Zur Erzeugung 1 Lichtjahr-Schwingung“
10 cm	3 Milliarden		Dezimeter-Wellen
1 cm	30 Milliarden		Kürzeste elektrisch erzeugbare Schwingungen
1 mm	300 Milliarden		Fernsehen  Radar  Überlappung der Gebiete
100 μ	3 Billionen		
10 μ	30 Billionen	Lichtwellen	Infrarote Strahlen  Wärmestrahlen 
1 μ	300 Billionen		Sichtbares Licht   
1000 Å	3000 Billionen		Ultra-violette Strahlen  Chemisch wirkende Lichtstrahlen  Höhen-sonne 
100 Å	30 000 Billionen	Gammastrahlen und Röntgenstrahlen	Überlappung der Gebiete
10 Å	300 000 Billionen		Röntgenstrahlen  Röntgenröhre
1 Å	3 Trillionen		
0,1 Å	30 Trillionen		
0,01 Å	300 Trillionen		
0,001 Å	3000 Trillionen		Gammastrahlen  Radioaktive Strahlung

Abbildung 1
Das Spektrum der elektromagnetischen Wellen

In dieser Übersicht nimmt von unten nach oben in jeder Zeile die Wellenlänge der Strahlung um einen Faktor 10 zu, bzw. die Frequenz um einen Faktor 10 ab. Von unten nach oben sehen wir

- Zunächst die sehr kurzwellige und energiereiche *Gamma-Strahlung*, wie sie in vielen Kernprozessen als radioaktive Strahlung frei wird.
- Es folgt die aus der Medizin her bekannte *harte und weiche Röntgenstrahlung* mit Wellenlängen bis zu 10 Å, das sind Millionstel Millimeter.
- Daran an schließt sich das *ferne und nahe UV*, das wir von der künstlichen und natürlichen Höhensonne her kennen. Wir können diese Strahlung nicht sehen, aber unsere Haut reagiert bereits empfindlich.
- Dann kommt das *sichtbare Licht*, für das unser Auge empfindlich ist, mit den Regenbogenfarben violett/blau/grün/gelb/rot. Insgesamt umfaßt es etwa eine Oktave, und hier spielte sich seit Tausenden von Jahren bis etwa Mitte unseres Jahrhunderts praktisch die gesamte Astronomie ab.
- Mit wachsender Wellenlänge folgt das *Infrarot*, das wir nicht mehr sehen können, aber in der Nähe eines heißen Ofens noch als Wärmestrahlung spüren.
- Dann gelangen wir in den weiten Radiobereich:
- Dieser beginnt mit der *Hochfrequenzstrahlung*, den *mm- bis dm-Wellen* der Radargeräte.
- Es folgen die *Meter-Wellen*, in denen das *Fernsehen* arbeitet,
- dann der *Kurz-, Mittel- und Langwellenbereich des Rundfunks*,
- und schließlich der *Niederfrequenzbereich* mit einigen 100 Schwingungen pro Sekunde. Hier arbeitet das Telefon, denn die Frequenz dieser elektromagnetischen Wellen entspricht genau der Frequenz der Schallwellen, mit denen wir sprechen. Hier können also diese beiden physikalisch ganz verschiedenartigen Wellen mittels Mikrophon und Lautsprecher leicht ineinander umgewandelt werden.
- Es endet bei 6000 km Wellenlänge oder 50 Hz mit dem *Wechselstrom*, wie er aus der Steckdose kommt.

Unsere Erdatmosphäre hat nun zwei Fenster, durch die überhaupt nur Strahlung aus dem Kosmos bis auf den Erdboden gelangen kann, alles andere wird in der Erdatmosphäre verschluckt, und zwar im ganzen Langwellenbereich durch die Ionosphäre, im Infrarot-Bereich hauptsächlich durch den Wasserdampf und im kurzwelligeren UV- und Röntgenbereich vorwiegend durch das Ozon. Für die Astronomie betrüblich, aber für unser Dasein sehr beruhigend, daß etwa Röntgen- und Gamma-Strahlung aus dem Kosmos nicht ungehindert auf den Erdboden gelangen können. Schon in 10 km Höhe, also dort, wo der Hauptflugverkehr stattfindet, ist die Strahlung aus dem Kosmos bereits rund 10mal so hoch wie am Erdboden (allerdings gilt Stewardess noch nicht als strahlengefährdeter Beruf!).

Nun die Fenster in der Atmosphäre. Das eine, das „optische Fenster“, umfaßt den sichtbaren Bereich und ragt an den beiden Seiten etwas in den Infrarot- und in den UV-Bereich hinein. Das ist natürlich kein Zufall. Die Evolution hat uns Augen gegeben, mit

denen wir auf der Erdoberfläche sehen können. Hätten wir „Röntgenaugen“, wäre es für uns hier dunkel.

Das zweite Fenster, das Radiofenster, ist sehr viel breiter, rund 10 Oktaven, von einigen mm bis 20 m Wellenlänge. Das ist die Domäne der Radioastronomie, als deren Vertreter heute Herr Mezger zu uns gesprochen hat. Dies ist der erste neu hinzugewonnene Spektralbereich.

Die Idee, daß unsere Sonne eine Radiostrahlung aussenden könne, wurde schon im vorigen Jahrhundert geäußert. Aber es gab damals keine Möglichkeit, dies zu beobachten. Etwa um 1920 war die Technik soweit, daß man die Radiostrahlung der Milchstraße hätte entdecken können. Da kam niemand auf die Idee, das zu versuchen. (Man wußte, daß die Plancksche Strahlung der Sterne viel zu schwach sei, und andere Mechanismen wie Synchrotronstrahlung waren unbekannt.) So wurde denn die außerirdische Radiostrahlung erst 1932 ganz zufällig von Jansky entdeckt. Jansky machte Versuche mit Antennen und ärgerte sich über täglich wiederkehrenden Störungen in der Apparatur. Als er dann aber merkte, daß diese Störungen jeden Tag etwa 4 Minuten eher kamen, also mit der Sternzeit gekoppelt waren, realisierte er, daß es sich um Strahlung aus dem Kosmos handeln müsse. Er hatte die galaktische Radiostrahlung entdeckt. Die eigentliche Entwicklung begann dann aber erst durch die im letzten Krieg stark entwickelte Radartechnik, und der aus deutschen Wehrmachtsbeständen stammende und von den Holländern erbeutete Radarspiegel „Würzburg-Riese“ war eines der ersten in Holland eingesetzten Radioteleskope. Und nun begann in aller Welt eine rasante Entwicklung.

Die Radioastronomie brachte nicht nur eine quantitative Vermehrung unserer Kenntnisse, sondern vor allem eine qualitative Erweiterung, denn es sind zum größten Teil ganz andere Objekte und ganz andere physikalische Vorgänge, von denen uns die Radiostrahlung Kunde bringt. Vieles hätte selbst mit den besten Methoden im optischen Bereich niemals entdeckt werden können. Ich will dies mit einigen Beispielen verdeutlichen.

Die interstellare Materie (also Staub- und Gaswolken zwischen den Sternen), deren Existenz Anfang des Jahrhunderts vermutet aber erst in den 20er Jahren eindeutig nachgewiesen wurde, besteht zu über 90 % aus Wasserstoff – und gerade der ist mit optischen Mitteln nicht zu beobachten. 1945 sagte der holländische Astronom van de Hulst theoretisch voraus, daß dieser interstellare Wasserstoff bei 21 cm Wellenlänge eine Spektrallinie aussenden müsse. Sechs Jahre später wurde diese Linie fast gleichzeitig und unabhängig voneinander in Holland, in Australien und in den USA entdeckt. Neben der Balmerserie ist es die wichtigste Spektrallinie in der Astronomie. Da es sich um eine Spektrallinie handelt und nicht um eine kontinuierliche Strahlung, läßt sich aus der Linienverschiebung über den Dopplereffekt auch sofort die Geschwindigkeit der Wasserstoffatome auf uns zu oder von uns fort bestimmen.

In der Ebene unseres Milchstraßensystems sammelt sich die interstellare Materie bevorzugt in den Spiralarmen an, ja, die Spiralarme sind geradezu durch die interstellare Materie charakterisiert. Und die 21 cm-Linie erlaubte es nun erstmals, den interstellaren Wasserstoff direkt zu sehen und zu lokalisieren. In jahrelanger Arbeit haben die Radioastronomen den ganzen Himmel durchmustert, konnten die Vermutung bestätigen, daß

auch unser Milchstraßensystem ein Spiralsystem ist, und konnten die Spiralstruktur bis in große Entfernungen nachweisen.

Die Milchstraße enthält nicht nur Gas, sondern auch Staubwolken, und diese verhindern es, mit optischen Mitteln jemals etwas über entferntere Gebiete oder auch über das Zentrum unseres Systems zu erfahren. Radiostrahlen aber durchdringen ungehindert diese Staubwolken (wir können ja auch bei Nebel und diesigem Wetter Radio hören und Fernsehen) und ermöglichen so die Erforschung dieser Gebiete, und Herr Mezger hat uns heute vormittag eindrucksvoll über die Erforschung des galaktischen Zentrums berichtet. Das soll hier nicht wiederholt werden.

Diese Fähigkeit, Staubwolken zu durchdringen, führte auch zur Entdeckung eines ganz anderen Phänomens, mit dem niemand auch nur im Entferntesten gerechnet hatte: die interstellaren Moleküle. Die Atome im interstellaren Raum stoßen immer mal wieder zusammen und können sich dann zu einem Molekül vereinen. Solche zwei-atomigen Moleküle, wie z.B. Hydroxyl (OH) oder Cyan (CN) oder Kohlenmonoxyd (CO) kannte man schon lange. Solch ein Molekül wird aber durch die UV-Strahlung der Sterne längst wieder zerstört, ehe es die Chance hat, ein drittes Atom einzufangen, denn im Mittel stoßen Atome im interstellaren Raum nur alle 100 Jahre einmal mit einem anderen Atom zusammen. Ins Innere dichter Staubwolken dringt die UV-Strahlung der Sterne aber nicht ein, außerdem ist hier die Dichte und damit die Zahl der Zusammenstöße größer. Da können sich dann kompliziertere Moleküle bilden. Wenn diese in Schwingungen geraten, senden sie Radiostrahlung aus, und diese kann die Staubwolke verlassen und uns Kunde bringen vom dem, was sich da gebildet hat. 1963 wurde das schon bekannte OH-Molekül auch im Radiobereich bei 18 cm Wellenlänge entdeckt. 1966 folgte das erste mehratomige Molekül Ammoniak (NH_3), ein Jahr später der Wasserdampf (H_2O). Ab 1970 ging es dann Schlag auf Schlag. Heute kennen wir im interstellaren Raum rund 70, und wenn wir die Isotope getrennt zählen, sogar über 100 verschiedene Moleküle, davon etwa $\frac{1}{3}$ anorganische und $\frac{2}{3}$ organische Moleküle, bis hin zum 13atomigen Undekapentainnitril (HC_{11}N). Auch das erste Ringmolekül C_3H_2 wurde 1986 entdeckt. Insgesamt sind jedoch an all diesen Molekülen nur sechs Atomsorten beteiligt: H, C, N, O, Si und S.

Interessant ist ferner die 1975 in der Eifel entdeckte Ameisensäure mit den zugehörigen Molekülen des Methylalkohols und des Formaldehyds. Dann kam die nächste Stufe mit Äthylalkohol und Azetaldehyd, so daß mit ziemlicher Sicherheit auch die zugehörige – bisher nicht gefundene – Säure, die Essigsäure, vorhanden sein dürfte, und über die Essigsäure geht es im nächsten Schritt zur Aminosäure, diesem wichtigen biologischen Grundbaustein. Zur Zeit gibt es eine Art Wettrennen unter den Radioastronomen, denn jeder möchte natürlich als erster das erste Biomolekül entdecken. Ein neuer Forschungszweig, die Bio-Astronomie oder Kosmo-Biologie kündigt sich hier am Horizont an.

Doch die zahlreichen neu entdeckten Radioquellen boten weitere Überraschungen. Die zweitstärkste Radioquelle am nördlichen Himmel, die Quelle Cygnus A (also die erste im Sternbild Schwan gefundene Radioquelle) entpuppte sich als ein außergalaktisches System in einigen 100 Millionen Lichtjahren Entfernung. Optisch ist es nur ein schwaches, unscheinbares Objekt mit einem mehrfachen Kern, aber die Radiostrahlung

ist an die millionenmal so stark wie die unseres gesamten Milchstraßensystems. Stünde dieses Objekt in 10facher Entfernung, so wäre es immer noch eine helle Radioquelle, aber im optischen Bereich läge es außerhalb der Reichweite unserer heutigen Teleskope. So gibt es sicher viele Radioquellen, bei denen wir optisch nichts mehr sehen können.

Cygnus A war das erste einer neuen und sehr vielseitigen Gruppe von Objekten wie Radiogalaxien, Quasars, Seyfert-Galaxien, Blazars, Liners, u. a., die man alle unter dem Begriff „Aktive Galaxien“ zusammenfassen kann. Es handelt sich um Sternsysteme, in denen sich gewaltige, katastrophenartige Dinge abspielen. Die ganzen Zentralgebiete dieser Galaxien befinden sich in einer Explosionsphase und Radiojets werden Millionen von Lichtjahren herausgeschleudert. Häufig kommt die Radiostrahlung gar nicht aus der optisch sichtbaren Galaxie, sondern aus Gebieten, die symmetrisch zum Zentrum weit außerhalb der Galaxie liegen. Die Radioquelle 3C 236 hat eine Ausdehnung von rund 20 Millionen Lichtjahren und ist damit das ausgedehnteste Einzelobjekt im Kosmos, das wir kennen. Es handelt sich hier um Synchrotronstrahlung der herausgeschleuderten Materie.

Auch für die Kosmologie, der Lehre vom Ursprung des Universums, lieferte die Radioastronomie wichtige Beiträge. Die schon in den 20er Jahren beobachtete Expansion des Kosmos führt, wenn man sie zurückrechnet, auf einen Anfangszustand des Universums von ungeheurer Dichte und extrem hoher Temperatur. Dies hatte zur Theorie des „Urknalls“ geführt. 1948 sagte Gamow theoretisch voraus, daß in diesem Falle als Überrest dieser gewaltigen Temperatur, die dann im Laufe der Expansion abkühlte, der gesamte Kosmos heute mit einer thermischen Strahlung von jetzt sehr geringer Temperatur erfüllt sein müsse, eine Strahlung, deren Maximum nach dem Planckschen Gesetz im mm-Bereich liegen müsse. 17 Jahre später, 1965, wurde diese allgemeine Hintergrundstrahlung mit einer Temperatur von 2,7 K (also sehr nahe dem absoluten Nullpunkt bei -273°C) von A. A. Penzias und R. W. Wilson entdeckt. Sie erhielten hierfür 1978 den Nobelpreis. Diese Hintergrundstrahlung ist heute neben der Expansion das stärkste Indiz für den Urknall.

Schließlich sei noch ein letztes exotisches Gebilde genannt, das durch die Radioastronomie bekannt wurde. 1957 wurde bei einer Routine-Untersuchung ein Objekt beobachtet, das nicht kontinuierlich strahlt, sondern pro Sekunde 33 Lichtblitze oder – genauer gesagt – Radiopulse zu uns sendet. Der erste Pulsar war entdeckt. Die Pulse kamen so regelmäßig, daß man kurzzeitig ernsthaft Signale außerirdischer Intelligenzen in Betracht zog, die berühmten „Kleinen grünen Männchen“. Aber es gibt auch in der Natur sehr regelmäßige Vorgänge, vor allem Rotationen. Und in der Tat, es handelt sich um schnell rotierende Neutronensterne, sehr kompakte Sterne im Endstadium ihrer Entwicklung.

Neutronensterne rotieren ungeheuer schnell, das sie umgebende Magnetfeld erreicht fast Lichtgeschwindigkeit und aus relativistischen Gründen kann die Strahlung den Stern dann nicht mehr nach allen Seiten verlassen wie bei unserer Sonne, sondern nur in Richtung der magnetischen Achse. Und dieser Lichtstrahl streicht dann, wie bei einem Leuchtturm an der Küste, in jeder Sekunde 33 mal über uns hinweg. Als man dies erkannte hatte, konnte man bald nachweisen, daß auch das sichtbare Licht nur in Form von

Lichtblitzen zu uns kommt. Wieso hatte man das vorher nicht gemerkt, handelt es sich um einen relativ hellen Stern. Nun, auch bei diesem Stern betrug die normale Belichtungszeit einige Minuten und dabei schmierte man über alle Lichtblitze hinweg. Auch das Auge kann 33 Lichtblitze pro Sekunde nicht mehr auflösen. Wir merken ja auch nicht, daß das Licht unserer Lampen hier in jeder Sekunde 100mal hell und dunkel wird.

Dieser erste Pulsar und Neutronenstern ist der Überrest einer gewaltigen Sternexplosion, einer sogenannten Supernova, deren Aufleuchten im Jahre 1054 uns aus chinesischen Quellen überliefert ist. Die damals abgeschleuderte Materie, die immer noch mit rund 1000 km/sek auseinanderlaufende Explosionswolke beobachten wir heute noch. Es ist der bekannte Crabnebel, noch heute eine der stärksten Radioquellen am nördlichen Himmel. Inzwischen kennen wir über 300 solche Pulsars, die meisten aber nur im Radiobereich.

Dies ist der Moment, auf einen generellen wichtigen Gesichtspunkt hinzuweisen. In den Neutronensternen haben wir Materie in ganz extremen Zuständen vor uns, hier im Zustand extrem hoher Dichte. Ähnliches gilt für die Schwarzen Löcher oder – am anderen Extrem – für die interstellare Materie, wo wir extrem geringe Dichte vorfinden, Dichten, von denen Hochvakuum-Experten auf der Erde nur träumen können. Und an dem Verhalten der Materie in solch extremen Zuständen sind die theoretischen Physiker sehr interessiert, weil sie hier neue und grundsätzliche Erkenntnisse gewinnen können. Der Kosmos stellt in vielen Teilen sozusagen ein Laboratorium dar mit Bedingungen, die der Experimentalphysiker auf der Erde nicht realisieren kann. So ist das Wechselspiel zwischen Physik und Astrophysik, das natürlich immer bestand, in den letzten Jahrzehnten besonders intensiv geworden, und es ist kein Zufall, daß an vielen Instituten der theoretischen Physik heute astrophysikalische Probleme behandelt werden. Ähnliches gilt auch für die Plasmaphysik, denn der weitaus größte Teil des Universums befindet sich im Zustand des Plasma. Es wird immer deutlicher, wie verwoben die Disziplinen miteinander sind, und viele grundlegende physikalische Erkenntnisse wurden in den vergangenen Jahrzehnten in der Astrophysik gewonnen.

Aber schauen wir uns nun die anderen neu erschlossenen Spektralbereiche an, bei denen ich mich kürzer fassen will.

Zwischen dem Radio- und dem sichtbaren Bereich liegt das Infrarot. Die Infrarot-Astronomie, als deren Vertreter heute Herr Elsässer unter uns ist, befindet sich gegenwärtig in einem enormen Aufschwung. Die Infrarot-Beobachtung erfolgt teilweise in einigen Fenstern vom Erdboden aus, vor allem auf hohen Bergen in trockener Luft, teilweise von Satelliten aus.

Die Infrarot-Astronomie führt uns, neben anderen interessanten Beobachtungen, z. B. in das Frühstadium der Sterne. Wenn sich Sterne aus der interstellaren Materie bilden, so sind sie zunächst in eine ausgedehnte Staub- und Gashölle eingebettet, so daß der Stern selbst lange nicht zu sehen ist. Er erwärmt aber diesen Staub von Innen her und dieser beginnt im Infraroten zu strahlen. Das aber ist gerade die Phase der Planetenentstehung. Durch die Infrarotastronomie wird diese interessante Phase der Beobachtung zugänglich und auch über die Entstehung unseres eigenen Planetensystems gewinnen wir hieraus neue Erkenntnisse.

Die Infrarotstrahlung durchdringt, ähnlich wie die Radiostrahlung, sehr viel besser den interstellaren Staub als das sichtbare Licht, und so hat auch die Infrarotastronomie erheblich zur Erforschung des galaktischen Zentrums beigetragen. Besonders interessante Ergebnisse erhielt die Infrarotastronomie im Bereich der extragalaktischen Forschung, insbesondere durch die Beobachtungen des Infrared Astronomical Satellite IRAS, also durch Beobachtungen außerhalb der Erdatmosphäre, ungestört von der Wasserdampfabsorption. Über diese neuen Ergebnisse der „Infraroten Galaxien“ hat uns Herr Elsässer heute vormittag ausführlich berichtet. – In Vorbereitung befindet sich das Infrared Space Observatory ISO, das uns weiteres interessantes Material liefern wird.

Zwischen dem Infraroten und dem Radiobereich bestand lange Zeit eine Lücke im Submillimeter- und Millimetergebiet, also bei Wellenlängen von 0.1 bis zu einigen mm. Hier fehlte es an guten Empfängern. Inzwischen haben aber die Infrarot-Astronomen ihre Empfangstechniken zu immer längeren und die Radioastronomen ihre ganz anderen Methoden zu immer kürzeren Wellenlängen hin erweitert. Und jetzt haben sich die beiden im Submillimetergebiet getroffen, so daß jetzt auch diese letzte Lücke geschlossen ist. Schon entstehen überall neue Teleskope für diesen Bereich, z. B.:

- ein 15 m-Teleskop bei der Europäischen Südsternwarte in Chile,
- ein 15 m-Teleskop auf dem Mauna Kea auf Hawaii,
- ein 30 m-Teleskop auf dem Pico Veleda in Südspanien, ein Deutsch-Französisches Projekt (IRAM).

Und nun gehen wir auf die andere Seite des sichtbaren Lichts, zu kürzeren Wellenlängen, also in den UV- und Röntgenbereich. Die ersten Beobachtungen erfolgten hier von bis zu 40 km hoch fliegenden Ballonen mit astronomischen Instrumenten. Dann kamen die Raketen, die die Instrumente kurzfristig noch höher bringen konnten. Der eigentliche Durchbruch aber kam erst mit den Satelliten, die in einigen 100 km Höhe die Erde umkreisen oder sich in einer geostationären Bahn in 36000 km Höhe befinden und nun eine kontinuierliche Beobachtung ermöglichen.

Im Ultravioletten hat der 1978 gestartete Satellit „International Ultraviolet Explorer“ (IUE) enorm viel Material geliefert. Deutschland war dabei finanziell beteiligt, so daß wir hier direkte Beobachtungsmöglichkeiten hatten. Ich will hierauf ein klein wenig näher eingehen, weil eine kleine, von mir geleitete Arbeitsgruppe an der Göttinger Sternwarte direkt daran beteiligt war. Ein kurzer Einschub für Spezialisten: der IUE besitzt ein Cassegrain Fernrohr von 45 cm Öffnung und 7 m Brennweite, im Fokus einen Echelle-Spektrograph, der in der 70. bis 125. Ordnung arbeitet und den Bereich von 110 bis 320 nm überdeckt. Gespeichert wird auf einer CCD-Platte mit 770×770 Pixels, und die Daten werden dann auf die Erde heruntergefunkt und dort wieder zu einem Spektrum zusammengesetzt.

Unsere Arbeitsgruppe beschäftigte sich mit den sogenannten CP2-Sternen, das sind „chemical peculiar stars“ mit starken Magnetfeldern. Diese Sterne zeigen eine 10- bis 1000fache Überhäufigkeit der Lanthaniden oder Seltenen Erden und etlicher sehr schwerer Elemente. Die Oberflächentemperaturen dieser Sterne betragen etwa 10000 K, das Maximum ihrer Ausstrahlung liegt also nach dem Planckschen Gesetz im Ultravioletten,

und im Ultravioletten liegen auch die meisten Spektrallinien der uns interessierenden Elemente. Hier waren UV-Spektren also sehr vielversprechend. Ein Mitarbeiter, Herr Fuhrmann, nahm sich, um dies neue Gebiet zu erkunden, den Stern HR 465 im Andromeda vor. Das Magnetfeld dieses Sterns variiert mit einer Periode von 23 Jahren. 1961 zeigte dieser Stern ein sehr linienreiches Spektrum speziell der Seltenen Erden. 10 Jahre später war das Spektrum sehr linienarm und man konnte, wenn man die Spektren nebeneinander hielt, kaum glauben, daß es sich um ein und denselben Stern handelt. Unsere Spektren stammen von 1981, als die Linien wieder ein Maximum zeigten. Herr Fuhrmann erstellte aus dem Material einen, auch für andere UV-Beobachter sehr nützlichen Spektralatlas, der rund 10 000 Spektrallinien enthält. Von diesen konnte er in mühevoller Arbeit rund 4600 identifizieren. Über die Hälfte der Linien konnte also nicht identifiziert werden. Dies liegt vor allem daran, daß die Spektren der seltenen Erden im UV zum großen Teil noch gar nicht bekannt sind. Hier sind die Physiker weit hinter den Wünschen der Astronomen zurück. Außerdem stellen diese Sterne auch viel effektivere Lampen dar, als dies im Labor möglich ist. Viele Linien können daher bisher im Labor noch gar nicht realisiert werden. Auch für den Physiker sind daher diese IUE-Spektren von großer Bedeutung. Von den 4600 identifizierten Linien stammen allein 2900 vom ionisierten Eisen. Eine Analyse der restlichen 1700 Linien ergab dann eine Überhäufigkeit folgender Seltenen Erden: Cer (58), Europium (63), Gadolinium (64), Dysprosium (66) und Erbium (68); ferner eine Überhäufigkeit der schweren Elemente Gallium (31), Zink (39), Niob (41), Molybdän (42), Osmium (76), Platin (78), Gold (79), Quecksilber (80) und Wismut (83).

Wie kommt es zur Überhäufigkeit gerade dieser Elemente. Sehr wahrscheinlich handelt es sich, besonders bei den Seltenen Erden, nur um eine Überhäufigkeit in einer bestimmten Schicht und damit letztlich um eine physikalische und nicht um eine chemische Anomalie. Es handelt sich um eine spezielle Diffusion. Wir alle kennen die Diffusion infolge der Schwerkraft. Da kommt es, z. B. in unserer Erdatmosphäre, zu einer Segregation, die schweren Elemente sinken nach unten, die leichten sammeln sich oben an. Es gibt aber noch einen zweiten Diffusionseffekt, der hier offenbar überwiegt. Einmal haben Sterne mit starkem Magnetfeld eine relativ ruhige Atmosphäre ohne Turbulenz, es gibt also keine ständige Durchmischung. Ferner handelt es sich stets um langsam rotierende Sterne. Nun haben gerade die Seltenen Erden ein sehr komplexes Termschema, die Elektronen in den Atomhüllen reichen weit nach außen und haben sehr viele Übergangsmöglichkeiten. Diese Atome haben darum einen großen Wirkungsquerschnitt gegenüber der aus dem Sterninneren kommenden Strahlung. Und da passiert es dann, daß im Laufe von Jahrhunderten diese Elemente durch den Strahlungsdruck des Sterns allmählich nach oben gedrückt werden und sich dort sammeln. Und vielleicht spielt das Magnetfeld hier auch eine spezielle Rolle, etwa in dem Sinne, daß an den magnetischen Polen, wo die Feldlinien senkrecht aus der Oberfläche austreten, dieser Diffusionseffekt anders wirkt als am magnetischen Äquator, wo die Feldlinien parallel zur Oberfläche verlaufen. Daher die Variationen der Häufigkeit mit der Rotation. Bei einigen schweren Elementen, besonders bei denjenigen, die durch Neutroneneinfang gebildet werden, mag es in diesen Sternen auch echte chemische Anomalien geben. Diese Fragen sind noch ungeklärt.

Wir gehen weiter zu kürzeren Wellen, in den Röntgenbereich. Eine erste große Durchmusterung mit über 300 Röntgenquellen brachte der Satellit UHURU (das Wort stammt aus der Suahelisprache und bedeutet „Freiheit“, denn der Satellit wurde in Kenia gestartet und zwar am 12. Dez. 1970, dem 7. Jahrestag der Unabhängigkeit von Kenia). Ein großer Teil dieser Röntgenquellen konnte bis heute nicht mit optischen Objekten identifiziert werden. Es ist ähnlich wie in der Radioastronomie, daß wir viele dieser Objekte optisch nie werden sehen können, denn Röntgenstrahlung entsteht unter ganz anderen physikalischen Bedingungen als sichtbares Licht. – UHURU konnte nur die Intensität der Quellen messen, aber nichts über die Gestalt aussagen. 1978 startete der „Einstein-Satellit“, der als erster eine abbildende Optik besaß. Aber der große Aufschwung der Röntgenastronomie begann dann mit dem unter der Leitung von Herrn Trümper in Deutschland entwickelten Röntgensatelliten ROSAT, der 1990 startete. Er arbeitete von Anfang an hervorragend und hatte nach einem halben Jahr bereits 97 % des Himmels durchmustert und etwa 60 000 diskrete Röntgenquellen erfaßt. Seitdem beschäftigt sich ROSAT mit Detailuntersuchungen in ausgesuchten Feldern und überrascht uns laufend mit neuen Entdeckungen. Hierüber hat uns heute morgen Herr Trümper ausführlich berichtet, so daß ich es hier mit einer Aufzählung bewenden lassen will.

Da sind die Röntgendoppelsterne, die aussichtsreichsten Kandidaten für Schwarze Löcher. Da sind die Überreste von Supernova-Ausbrüchen und die Röntgenpulsare, darunter natürlich auch der schon erwähnte Crabnebel. Da sind die Galaxien in unserer Nähe; so entdeckte ROSAT allein im Andromedasystem mehr diskrete Röntgenquellen, als UHURU in unserer ganzen Milchstraße. Da sind vor allem die aktiven Galaxien: sehr raumtiefe Beobachtungen, also solche bis zu sehr schwachen Objekten, mit Belichtungszeiten bis zu 42 Stunden zeigen auf einer Fläche am Himmel, die so groß ist wie der Vollmond, fast 100 diskrete Röntgenquellen, davon 70 % Quasare, also aktive Galaxien. Dem allen ist ein diffuser Röntgenhintergrund überlagert, der vermutlich von nicht aufgelösten Quellen stammt. Anders als unser optischer Nachthimmel ist der Röntgenhimmel also hell.

Wenn in so exotischen Objekte wie den Röntgenpulsaren sehr starke Magnetfelder herrschen, dann fordert die Quantenmechanik, daß die Synchrotronstrahlung dieser Objekte quantisiert ist und als Spektrallinie im Röntgenbereich auftritt, der sogenannte Landau-Effekt. Tatsächlich wurde diese Linie schon vor etlichen Jahren von Herrn Trümper in der Radioquelle Herkules X1 gefunden und damit ein Magnetfeld von einigen Billionen (10^{12}) Gauß nachgewiesen (zum Vergleich: das Magnetfeld der Erde beträgt $\frac{1}{2}$ Gauß). Auch das sind Phänomene, die im Laboratorium nicht zu realisieren sind.

Insgesamt befindet sich die Röntgenastronomie gegenwärtig in einem Boom, wie die Radioastronomie in den ersten Nachkriegsjahrzehnten.

Schießlich am kurzweiligen Ende die Gamma-Astronomie. Sie steckt weitgehend noch in den Anfängen, verspricht aber sehr interessant zu werden. Schon seit 1967 werden von etlichen Raumsonden immer wieder Gammastrahlungs-Ausbrüche registriert, z. B. von den Meßgeräten der beiden Venussonden Venera 13 und 14. Ihrer Verteilung nach scheinen sie galaktischen Ursprungs zu sein. Rätselhaft war lange Zeit die 1972 entdeckte zweitstärkste Gamma-Quelle am Himmel „Geminga“ in den Zwillingen, ein

Objekt, das bis dahin weder im Röntgen-, noch im optischen oder im Radiobereich sichtbar war. Erst 10 Jahre später fand der EINSTEIN-Satellit etwa an der Stelle eine Röntgenquelle, und neue ROSAT-Daten zeigten dann eine Pulsperiode der Röntgenstrahlung von 0.24 s. Mit dem 1991 gestarteten Gamma-Ray-Observatory (GRO) und seinem Energetic-Gamma-Ray-Experiment-Telescope (EGRET) konnte dann gezeigt werden, daß auch die Gamma-Quanten mit der gleichen Periode ankommen, es sich also um dasselbe Objekt handelt, ein relativ naher Pulsar, etwa 300 000 Jahre alt.

Auch der Crabnebel, das galaktische Zentrum und Quasare konnten als Gamma-Quellen identifiziert werden. Hier dürfen wir sicher noch manche Überraschung erwarten.

Damit haben wir innerhalb eines halben Jahrhunderts unsere Basis um fast 18 Zehnerpotenzen oder von einer Oktave auf rund 60 Oktaven erweitert. Das ist etwa so, als wenn die Musik Jahrtausende lang nur eine einzige Oktave zur Verfügung gehabt hätte, und nun innerhalb von einigen Jahrzehnten den gesamten hörbaren Bereich umfaßt.

Noch gar nicht in Angriff genommen wurde der Bereich jenseits von 20 m Wellenlänge. Hier wird die Strahlung aus dem Kosmos an der Ionosphäre reflektiert. Satellitenbeobachtungen in diesem Bereich stehen noch nicht auf dem Plan. Die Astronomen erwarten hier auch keine aufregenden Dinge – aber das hat man früher bei anderen Bereichen auch gedacht. Wer weiß, ob es da nicht auch Überraschungen gibt. –

Ich komme zum Schluß. Wenn wir dies ganze Panorama an uns vorbeiziehen lassen, dann wird deutlich, wie sehr unser normales Weltbild dadurch bestimmt ist, daß wir Augen haben, die „zufällig“ in diesem optischen Bereich empfindlich sind, und wie ganz anders unser Welt aussähe, wenn wir Augen für einen anderen Spektralbereich hätten. Hätten wir Radioaugen, so gäbe es für uns kein schlechtes Wetter, wir könnten durch alle Wolken hindurchschauen. Die meisten Sterne, die wir nachts am Himmel sehen, wären uns aber unbekannt. Dagegen sähen wir Tag und Nacht das helle Band der Milchstraße am Himmel. Das hellste Objekt wäre eine 100 Millionen Lichtjahre entfernte Galaxie. Die Sonne wäre keine so übermäßig hell scheinende, scharf begrenzte Scheibe, wie wir sie kennen, sondern ein sehr viel schwächeres aber merklich größeres und ausgefranstes Gebilde, denn die Radiostrahlung der Sonne stammt aus ihrer Korona. Nur Eruptionen auf der Sonne würden plötzlich millionenmal so hell werden und wie Blitze alles andere überstrahlen. Unsere Welt sähe völlig anders aus! Und diese Erkenntnis sollte uns vielleicht etwas toleranter machen gegenüber den Menschen, die nun im übertragenen Sinne die Welt mit anderen Augen sehen.